

A Operação de Prensagem: Considerações Técnicas e sua Aplicação Industrial

Parte I: O Preenchimento das Cavidades do Molde

J.L. Amorós Albero

Instituto de Tecnologia Cerâmica, Universidad de Valência

Resumo: No desenvolvimento do tema se aborda primeiramente a preparação do pó para prensagem e os aditivos usualmente empregados (lubrificantes, plastificantes e ligantes). A seguir são analisados os fenômenos e processos que ocorrem nas distintas etapas da prensagem: preenchimento do molde, compactação e extração das peças prensadas. Na etapa da compactação, são estudados os estados e mecanismos de compactação, que relacionam a redução da porosidade da camada de aglomerados com a pressão de compactação. Posteriormente se estuda a influência das distintas variáveis de operação (em especial as características do pó) sobre a evolução da operação de compactação e as propriedades das peças. São abordadas as influências dos aditivos, a compactidade dos grânulos, o tamanho médio e a distribuição de tamanhos dos aglomerados e a estrutura dos grânulos. Finalmente se estuda a transmissão da pressão na camada de pó e, na prensagem uniaxial, o efeito de parede.

Também são estudadas as relações entre a resistência mecânica e as características das peças prensadas, analisando o efeito dos ligantes e da umidade; da compactidade das peças e da plasticidade e tamanho dos grânulos do pó granulado. Na parte final são detalhados os dois tipos de prensagem, o iniaxial e o isostático, apresentando as diferenças das técnicas e dos programas de compactação usualmente empregados na indústria assim como os principais defeitos e problemas associados às técnicas de prensagem.

Palavras-Chave: *pó de prensagem, aditivos, fases da prensagem, equação de compactação, resistência mecânica de peças prensadas, prensagem de revestimentos cerâmicos*

Introdução

A prensagem é a operação de conformação baseada na compactação de um pó granulado (massa) contido no interior de uma matriz rígida ou de um molde flexível, através da aplicação de pressão. A operação compreende três etapas ou fases: (1) preenchimento da cavidade do molde, (2) compactação da massa e (3) extração da peça.

Este é o procedimento de conformação mais utilizado pela indústria cerâmica devido à sua elevada produtividade, facilidade de automação e capacidade de produzir peças de tamanhos e formas variadas, sem contração de secagem e com baixa tolerância dimensional.

Distinguem-se duas grandes modalidades de prensagem: a prensagem uniaxial e a prensagem isostática. Na primeira, a compactação do pó se realiza em uma matriz rígida, por aplicação de pressão na direção axial, através de punções rígidas. É utilizada para conformar peças que não apresentam relevo superficial na direção de prensagem. Se a espessura da peça que se deseja obter é pequena e sua

geometria é simples, a carga pode ser aplicada em apenas um sentido (ação simples) (Figura 1). Por outro lado, para conseguir peças de grande espessura e geometria complexa, com uniformidade de compactação, é indispensável que a prensagem seja feita nos dois sentidos (dupla ação), ou então que se empregue um molde complexo com múltiplos punções.

A fricção entre as partículas do pó e também a fricção entre elas e a superfície do molde impedem que a pressão, aplicada a uma ou mais das superfícies da peça, seja integralmente transmitida e de forma uniforme a todas as regiões da peça, o que provoca a existência de gradientes de densidade nos corpos conformados (Figura 2).

Na prensagem isostática, a compactação do pó se dá no interior de um molde flexível, sobre o qual atua um fluido pressurizado (Figura 3). Este procedimento assegura uma distribuição homogênea da pressão sobre a superfície do molde. É empregado na fabricação de peças de formas complexas, que apresentem relevos em duas ou mais di-

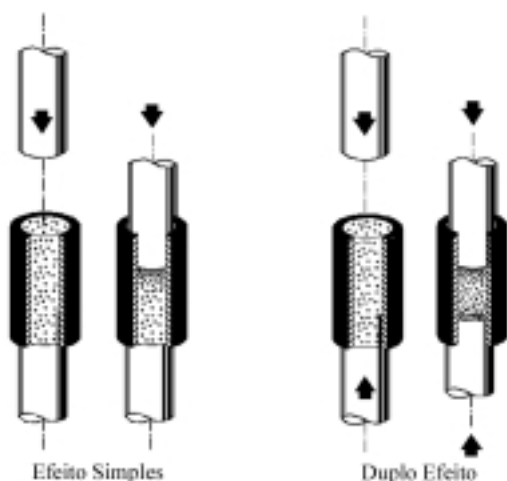


Figura 1. Prensação Uniaxial.

reções, ou em peças onde uma das dimensões é muito maior que as demais, como no caso de tubos e barras.

Objetivo

Os objetivos da operação de prensagem, de forma idêntica a qualquer operação de conformação, como colagem ou extrusão, são: obter peças uniformes, de acordo com as dimensões e a geometria pré-estabelecidas, bem como contribuir na obtenção de uma microestrutura adequada às características finais desejadas.

Tanto a seleção e dosagem das matérias-primas a serem empregadas como as condições de operação envolvidas em todas as etapas do processo de fabricação devem ser consideradas como uma seqüência de etapas integradas, que deliberadamente e de forma sistemática transformam uma determinada formulação em um produto acabado, passando por diversos produtos intermediários. De acordo com este conceito de processo global, cada uma das etapas, e no nosso caso a prensagem, não pode ser tratada de maneira isolada, uma vez que sua realização e as características microestruturais da peça a verde resultante dependem das características microestruturais das matérias-primas, bem como das etapas do processo produtivo que precedem a operação de prensagem.

Sendo assim, a técnica de preparação empregada na obtenção da massa (granulação ou atomização) irá influenciar as características da massa resultante, como sua distribuição de tamanho de partículas, a forma e textura dos grânulos (atomização) ou aglomerados (granulação), que por sua vez irão influenciar a etapa de prensagem e as características microestruturais da peça a verde obtida.

Por sua vez, as características microestruturais da peça a verde não só determinam suas propriedades mecânicas, mas também exercem influência nas etapas posteriores do processamento. Como conseqüência, as variáveis de operação envolvidas na etapa de prensagem deverão ser deter-

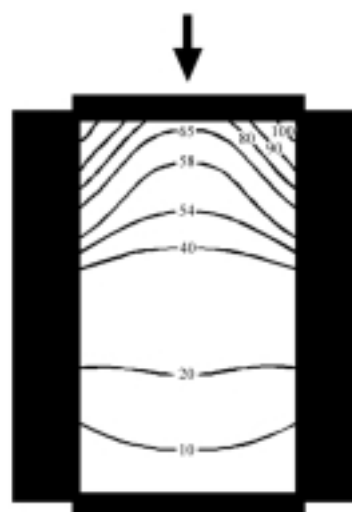


Figura 2. Variação da pressão de prensagem aplicada nas regiões do molde provocada pela fricção entre as partículas e entre estas e as paredes do molde.

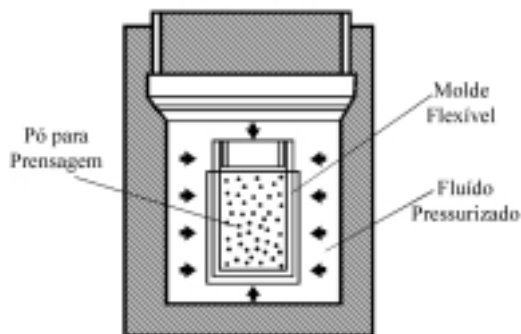


Figura 3. Prensação isostática.

minadas tendo em vista uma ordenação espacial das partículas (compactação), que assegure à peça conformada uma microestrutura que reúna os seguintes elementos:

Proporcione à peça a verde e após secagem uma resistência mecânica suficiente para suportar as diversas solicitações ao longo do processo produtivo (secagem, decoração, transporte, armazenagem e queima)

Confira a peça uma permeabilidade suficiente para que todos as reações que envolvam troca de gases durante a etapa de aquecimento se completem no tempo adequado.

Permita que o produto final apresente as características microestruturais desejadas (porosidade, distribuição de tamanho de poros, tamanho de grão, etc...), que irão determinar as características técnicas da peça (resistência mecânica, absorção de água, etc...).

Preparação da massa e aditivos de prensagem

A preparação da massa tem por objetivos:

- Proporcionar uma mistura íntima e homogênea das matérias-primas (bem como dos aditivos);

- Adequar a massa para a etapa de prensagem;

Para que a operação de prensagem se desenvolva de maneira adequada é imprescindível que a massa possua, dentre outras, as seguintes características:

- Uma elevada fluidez, para que durante a fase de preenchimento das cavidades do molde, cuja dosagem se realiza por medida de volume, a massa escoie rapidamente e preencha o molde de maneira homogênea e reprodutível;
- Uma elevada densidade de preenchimento, para que a quantidade de ar a ser expulsa durante a fase de compactação seja mínima;

Estes dois primeiros requisitos implicam que a massa deverá ser constituída por grânulos de geometria esférica, ou aproximadamente esférica, de tamanho superior a 60 µm, e textura o mais lisa possível.

As características mecânicas dos grânulos, tais como dureza, resistência mecânica e plasticidade devem ser adequadas. Os grânulos devem ser suficientemente moles e deformáveis, para que durante a fase de compactação, em pressões moderadas, se deformem plasticamente, facilitando o deslizamento das partículas que o compõe. Por outro lado, os grânulos não podem ser tão frágeis, moles e deformáveis a ponto de se romperem, deformarem ou aglomerarem uns aos outros durante as operações de armazenagem e transporte que antecedem a etapa de prensagem.

Contribuir para a obtenção de peças suficientemente rígidas que resistam à etapa de extração do molde e as subsequentes etapas do processamento.

As características mecânicas dos grânulos, da mesma forma que nas peças conformadas, dependem, sobretudo, de sua porosidade e do tamanho das partículas primárias que os compõe, e da natureza e resistência das ligações químicas que se estabelecem entre elas. Esta última propriedade pode ser alterada mediante o emprego de aditivos.

Desta forma, os aditivos a serem utilizados, bem como a proporção com que são adicionados à massa deverão ser definidos tendo em vista o efeito que possuem sobre

o comportamento mecânico tanto dos grânulos como da peça conformada. A definição da mistura de aditivos a ser utilizada é uma operação complicada, uma vez que uma determinada mistura pode ser bastante adequada a uma determinada fase da operação de prensagem, e ao mesmo tempo apresentar sérios inconvenientes para a execução de outras etapas, ou mesmo para as características mecânicas da peça conformada a verde, como veremos ao longo do texto.

As massas são obtidas geralmente através de secagem por atomização de uma suspensão de matérias-primas (via úmida), à qual se adicionam normalmente defloculantes, ligantes, plastificantes e, em alguns casos, lubrificantes. Na Tabela 1 são descritos os aditivos mais empregados pela indústria cerâmica.

Os ligantes orgânicos têm a função de conferir ao grânulo e a peça conformada uma suficiente resistência mecânica, e devem ser empregados em proporções inferiores a 5% em peso. Os plastificantes aumentam a deformabilidade do ligante e reduzem sua capacidade de adsorção da umidade ambiente. A umidade normalmente atua como plastificante secundário, fator pelo qual deve ser controlada sua quantidade adsorvida no intervalo entre as etapas de granulação e prensagem.

O lubrificante tem como funções reduzir a fricção entre os grânulos da massa e a parede do molde durante a etapa de compactação, e também reduzir o atrito entre a peça conformada e a parede do molde durante a etapa de extração da peça. Os lubrificantes podem ser adicionados durante a formação dos grânulos ou posteriormente, como forma de recobrimento. Alguns ligantes, como aqueles formados por mistura de ceras e polietilenoglicol, apresentam também propriedades lubrificantes.

No caso dos aditivos orgânicos, como o PVA, a proporção a ser utilizada é limitada pelo fator custo, que incide tanto no preço do aditivo, como também no custo indireto de eliminação associado à sua combustão, durante a etapa de queima.

Tabela 1. Aditivos empregados industrialmente na prensagem de massas.

Produto	Ligante	Plastificante	Lubrificante
Alumina	P.V.A. ^a	Polietilenoglicol ^b	Estearato de Magnésio
Substratos de alumina	Polietilenoglicol ^c	Nenhum	Talco ^d , Argila ^d
MnZn Ferritas	P.V.A. ^a	Polietilenoglicol ^b	Estearato de Zinco
Titanato de Bário	P.V.A. ^a	Polietilenoglicol ^b	
Esteatita	Cera microcristalina, argila ^d	Água	Cera, Talco ^d , Argila ^d
Revestimentos Cerâmicos	Argila ^d	Água	Talco ^d , Argila ^d
Porcelana de mesa	Argila ^d , polisacarídeos	Água	Argila ^d
Refratários	Lignosulfatos de cálcio-magnésio	Água	Estearato

Legenda: a = de baixa viscosidade; b = de baixo peso molecular (400); c = de alto peso molecular (20.000); d = de tamanho coloidal.

Análise dos fenômenos e processos que se desenvolvem em cada uma das operações de prensagem

Para que esta fase da operação de prensagem se desenvolva rapidamente e para que a distribuição da quantidade de massa na cavidade do molde seja uniforme e reprodutível, é imprescindível que a massa flua bem sob o efeito das forças de gravidade, ou seja, possua uma boa fluidez.

O parâmetro que normalmente se emprega para caracterizar a fluidez de uma massa é a velocidade de fluxo. Este parâmetro é determinado através da medida da velocidade com que a massa escoou (cm^3/s), devido à força de gravidade, através do orifício de um recipiente de forma cônica (Figura 4). Outros métodos existentes são o Índice de Hausner e o Ângulo de Repouso, empregados para a caracterização da fluidez de massas em geral (granuladas ou não), que, entretanto, apresentam uma menor sensibilidade e reprodutibilidade quando comparados com a velocidade de fluxo para avaliar o comportamento de massas de elevada fluidez.

As características da massa que determinam sua fluidez são a distribuição granulométrica, a forma, a textura superficial dos grânulos e também a aderência apresentada pelos grânulos entre si.

Na Figura 5 são representadas as velocidades de fluxo, correspondentes a diferentes frações de massas atomizadas, em função do respectivo tamanho médio de grânulo. Também são apresentadas micrografias correspondentes às respectivas frações granulométricas.

Podemos ver que as frações de grânulos de tamanho intermediário, entre 125 e 500 μm , são as que apresentam maiores velocidades de fluxo, como consequência de sua adequada morfologia (praticamente esféricas), e tamanhos relativamente grandes. Os grânulos de tamanho inferior apresentam uma velocidade de fluxo sensivelmente menor quando comparado aos resultados das demais frações

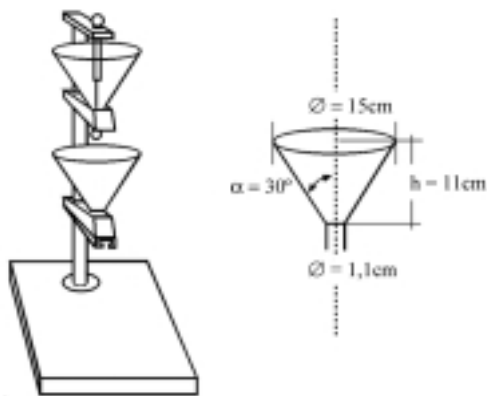


Figura 4. Equipamento para a medida da velocidade de fluxo de massas cerâmicas.

granulométricas, devido ao fato de que, fixando-se os demais fatores, a fluidez da massa é reduzida à medida que se aumenta o número de pontos de contato entre os grânulos por unidade de volume. Por outro lado, as frações de grânulos com tamanhos superiores a 500 μm apresentam velocidades de fluxo menores, quando comparadas às frações intermediárias. Estes valores se devem ao fato de que os aglomerados correspondentes a estas frações são formados por grânulos grandes, aos quais, durante à etapa de secagem por atomização, grânulos menores se aderiram, resultando em aglomerados de morfologia irregular.

A influência da textura superficial do aglomerado sobre a fluidez se torna clara na Figura 6, onde são apresentadas micrografias de grânulos obtidos por atomização, que apresentaram uma velocidade de fluxo de 25,2 cm^3/s , e aglomerados de mesmo tamanho obtidos por granulação, que apresentaram uma velocidade de fluxo de 22 cm^3/s . Nota-se claramente que a principal diferença estrutural entre os dois aglomerados é a textura superficial, sendo que o pó obtido por granulação apresenta uma rugosidade maior que aquela do pó obtido por atomização.

Estudos demonstram que a presença de uma pequena fração (cerca de 5%) de aglomerados de pequeno tamanho, inferiores a 125 μm , na massa reduz o valor da fluidez de 25,2 para 24 cm^3/s . Isto se deve a que o número de pontos de contato entre os aglomerados por unidade de volume é sensivelmente aumentado, pois os grânulos de menor

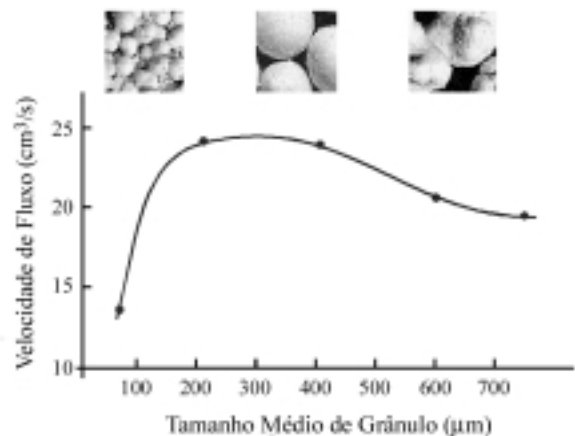


Figura 5. Relação entre a fluidez e o tamanho de grânulo.

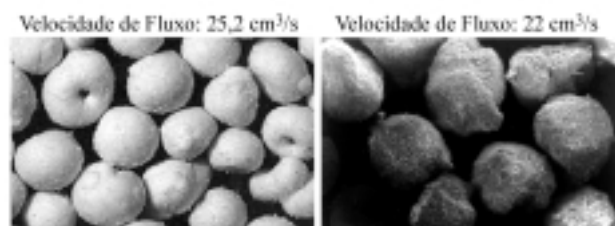


Figura 6. Efeito da textura superficial do grânulo sobre a velocidade de fluxo da massa.

tamanho passam a ocupar os espaços não preenchidos pelos grânulos maiores.

Na Figura 7 é apresentada, para uma massa obtida por secagem via atomização empregada na fabricação de revestimentos cerâmicos, na qual o ligante é a fração coloidal de argila e o plastificante é a água, a variação da velocidade de fluxo em função do teor de umidade da massa. Como se pode observar, a velocidade de fluxo diminui à medida que se aumenta o teor de umidade da massa, sendo este efeito muito mais pronunciado para teores de umidade superiores a 0,05 – 0,06 kg água/ kg sólido seco (aproximadamente 5 a 6% de umidade), que são os teores tipicamente utilizados pela indústria cerâmica.

A diminuição da fluidez da massa com o aumento do teor de umidade é devida ao aumento das forças de adesão nos pontos de contato existentes entre os grânulos, devido à tensão superficial da água. Um comportamento semelhante, embora mais exagerado (Figura 8), também é observado quando se analisa a velocidade de fluxo de grânulos de alumina que contém álcool polivinílico como ligante em função da umidade relativa da atmosfera em que a massa está armazenada. Neste caso, as superfícies dos grânulos se tornam adesivas devido à ação plastificante da água adsorvida da atmosfera.

A massa a ser empregada na compactação deve possuir uma densidade relativa (ρ_o) ou “compacidade” elevada. A densidade relativa é definida como sendo a razão entre a densidade de preenchimento (ρ_{ap0}) e a densidade real das partículas (ρ_s). Uma densidade relativa excessivamente baixa indica uma razão de compactação (volume ocupado pelos grânulos/volume ocupado pela respectiva peça conformada) muito elevada, o que se traduz de um lado, em um elevado conteúdo de ar que deve ser extraído durante a fase de compactação, e de outro, em um excessivo deslizamento do molde durante a mesma etapa da operação de prensagem. Ambos fatores ocasionam problemas durante a execução da operação de prensagem, e podem originar defeitos no produto acabado. Normalmente, razões de compactação superiores a 2,5 podem ser consideradas excessivas.

A densidade relativa da massa depende do volume de poros intergranulares (espaços vazios entre os grânulos), V_{pg0} , e do volume de poros intragranulares (poros existentes no interior dos grânulos), V_{pp0} , ambos por unidade de volume do sólido, V_s (Figura 9).

A razão volume de poros intergranulares/volume do sólido (V_{pg}/V_s)₀ da massa depende da estrutura dos grânulos (maciços ou com irregularidades na superfície, como crateras e grânulos menores aderidos), da distribuição do tamanho dos grânulos e da fluidez do pó. Uma baixa fluidez da massa resulta em uma baixa densidade relativa da massa vertida na cavidade do molde, ainda que sua distribuição

de tamanhos (distribuição granulométrica) seja adequada para um bom empacotamento.

Ainda que em princípio uma forma de reduzir estes poros ou espaços intergranulares durante o preenchimento seja utilizar distribuições granulométricas largas, este procedimento não deve ser empregado, já que pode ocasionar problemas de uniformidade devido à segregação dos grânulos por faixas de tamanho.

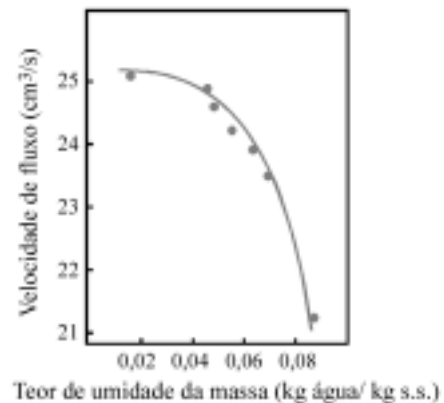


Figura 7. Efeito do teor de umidade da massa sobre a velocidade de fluxo.

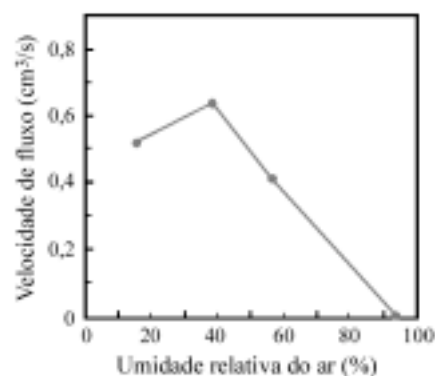


Figura 8. Efeito do teor de umidade da massa sobre a velocidade de fluxo.

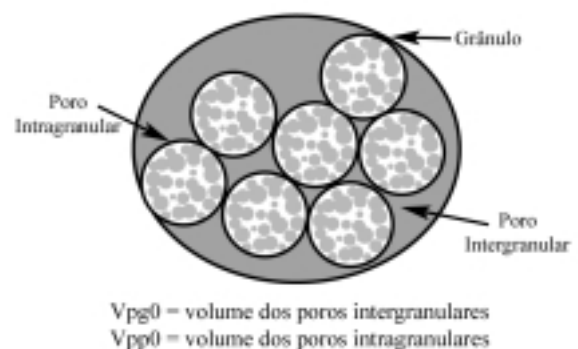


Figura 9. Preenchimento do Molde.

A razão volume de poros intragranulares/volume de sólido (V_{pp}/V_s) da massa depende da forma e distribuição de tamanho das partículas que constituem os grânulos e das condições de processamento envolvidas em sua obtenção. A utilização de uma distribuição de tamanho de partículas de acordo com os modelos propostos por Furnas, Andreasen, Westam, dentre outros, promovem um empacotamento de partículas de elevada densidade relativa. Por outro lado, se os grânulos são obtidos por atomização, para

que o empacotamento das partículas que constituem os grânulos seja o mais elevado possível, é imprescindível que as características da suspensão (fundamentalmente o teor de sólidos e viscosidade) e as variáveis de operação da etapa de secagem por atomização (temperatura de secagem) sejam adequadas. Desta forma também se evita ou reduz na medida do possível a quantidade e tamanho das crateras, vazios e poros existentes no volume dos grânulos.